

## Perspektiven zum Forschungsfeld Neuroarbeitswissenschaft und neuroadaptive Systeme

# Neuroarbeitswissenschaft: Gehirn und Arbeit vereint

M. Vukelić, N. Tagalidou, K. Hölzle

**ZUSAMMENFASSUNG** Neuroarbeitswissenschaft und neuroadaptive Systeme ermöglichen es, mentale Zustände präzise zu erfassen und gezielt für die menschenzentrierte Gestaltung digitalisierter Arbeitstechnologien und -welten einzusetzen. Gerade in einer zunehmend automatisierten und datengetriebenen Arbeitsumgebung gewinnt das Verständnis kognitiver Prozesse und Zustände an Bedeutung. Der Beitrag bietet eine Übersicht aktueller neuroadaptiver Technologien, konkreter Anwendungsszenarien sowie zentraler praktischer Herausforderungen und Perspektiven.

### STICHWÖRTER

Forschung, Künstliche Intelligenz (KI), Mensch und Technik

## Neuroergonomics: Uniting brain and work

**ABSTRACT** Neuroergonomics and neuroadaptive systems offer innovative approaches to accurately capture and leverage mental states for shaping human-centred digitalized technologies and workplaces. Understanding cognitive processes and states is becoming increasingly important in automated, data-driven work environments. This article provides an overview of current neuroadaptive technologies and practical application scenarios, and addresses key challenges and opportunities for research and economical implementation.

## 1 Neuroarbeitswissenschaft: Begriffsbestimmungen und Grundlagen

### 1.1 Definitionen und zentrale Zielsetzungen

Der Begriff Neuroarbeitswissenschaft (englisch: neuroergonomics) wurde erstmals Anfang der 2000er von *Raja Parasuraman* geprägt [1]. Er hat sich seitdem als eigenständiges Forschungsfeld mit dem Ziel etabliert, das Gehirn bei der Arbeit und im Alltag zu untersuchen. In den darauffolgenden Jahren hat sich das Feld kontinuierlich weiterentwickelt und zeigt sich heute mit zunehmend bedeutender, interdisziplinärer Forschung, die Erkenntnisse und Methoden aus der kognitiven Neurowissenschaft, Fortschritten in den Bildgebungsverfahren des Gehirns, der Informatik und Arbeitswissenschaft vereint, um die komplexe Interaktion zwischen Mensch, Technologie sowie Arbeits- und Lebenswelt besser zu verstehen und optimal zu gestalten [2, 3].

Die neuroarbeitswissenschaftliche Forschung erweitert die Ansätze der kognitiven Ergonomie, die primär auf experimentell-psychologische Verfahren und verhaltensbasierte Maße setzt, um Rückschlüsse von mentalen Prozessen wie Wahrnehmung, Gedächtnis und Problemlösen in der Interaktion mit technischen Systemen zu geben. Historisch versteht sich die Ergonomie allgemein als wissenschaftliche Disziplin, die sich mit der Interaktion zwischen Mensch und anderen Systemelementen beschäftigt. Ziel ist es, sowohl das menschliche Wohlbefinden als auch die Gesamtleistung von Systemen zu optimieren. Dazu werden Produkte, Systeme und Umgebungen an die physischen und kognitiven Fähigkeiten der Nutzenden angepasst, um Komfort, Sicherheit und Effizienz zu fördern.

Hieraus entwickelten sich weitere Fachdisziplinen, wie die Software-Ergonomie, die sich besonders auf die professionelle Nutzung von Computern und grafischen Benutzeroberflächen konzentriert, um die Produktivität von Mitarbeitenden zu erhöhen und gesundheitliche Belastungen zu minimieren. Mit dem Aufkommen digitaler Technologien rückte die User Experience (UX) zunehmend in den Fokus. Dadurch werden neben funktionalen Aspekten auch emotionale, motivationale und kulturelle Aspekte, die zu einer umfassenden positiven Nutzererfahrung führen sollen, berücksichtigt. Die neuroarbeitswissenschaftliche Forschung stellt eine Weiterentwicklung dieser Perspektiven dar, indem sie explizit neurophysiologische Messtechniken nutzt, um unmittelbaren Einblick in mentale Zustände, wie Aufmerksamkeit, Konzentration und Belastung, sowie emotional-affektive Prozesse und deren Zusammenhang mit neuronalen Prozessen zu erhalten.

Dabei besteht die zentrale Idee darin, die „Black Box“ mentaler Zustände zu öffnen und so die zugrunde liegenden neurokognitiven Prozesse zu verstehen, welche die menschliche Leistung und das Wohlbefinden außerhalb des Labors unterstützen. Ein wesentliches Forschungsgebiet ist hier die mentale Arbeitsbelastung (englisch: mental workload) [2, 3], die den kognitiven Aufwand beschreibt, den eine Person zur Erfüllung einer bestimmten Aufgabe aufbringen muss [4–6]. Entscheidend ist dabei die Balance: Weder Unter- noch Überforderung sind zielführend, sondern ein optimales Belastungsniveau, das sowohl Effizienz als auch Wohlbefinden fördert.

Eng damit verknüpft sind Konstrukte wie Aufmerksamkeit und Situationsbewusstsein, die eine zentrale Rolle in der Inter-

aktion zwischen Mensch und Technik spielen. Aufmerksamkeit beschreibt die Fähigkeit, relevante Reize selektiv wahrzunehmen und gleichzeitig irrelevante Informationen auszublenden [7]. Sie ist ein fundamentaler Bestandteil der menschlichen Informationsverarbeitung und beeinflusst direkt die mentale Arbeitsbelastung. In der kognitiven Psychologie existieren verschiedene theoretische Modelle zur Erklärung der Aufmerksamkeitssteuerung, etwa die Ressourcen-Theorie von *Kahnemann* [8], sowie das Mehrfachressourcen-Modell von *Wickens* [9].

Das Situationsbewusstsein (englisch: situation awareness) ist ein weiterer zentraler Aspekt der Neuroarbeitswissenschaft und beschreibt die Fähigkeit einer Person oder eines Systems, relevante Informationen aus der Umgebung wahrzunehmen, diese in den situativen Kontext einzuordnen und zukünftige Entwicklungen antizipieren zu können [10]. Ein hohes Situationsbewusstsein ist essenziell für die sichere und effiziente Mensch-Technik-Interaktion, insbesondere in dynamischen Arbeitsumgebungen.

Um die verschiedenen mentalen Konstrukte wie beispielsweise mentale Arbeitsbelastung besser zu verstehen, ist eine präzise Erfassung kognitiver Zustände erforderlich. Hier kommen vor allem moderne und mobil einsetzbare neurotechnologische Verfahren zum Einsatz, wie etwa die Elektroenzephalographie (EEG), funktionelle Nah-Infrarotspektroskopie (fNIRS) sowie verhaltensbasierte Daten (zum Beispiel Eye-Tracking, Kameradaten oder Facial Decoding), um mentale Zustände möglichst ganzheitlich und objektiv zu erfassen. Somit lassen sich erstmals völlig neue empirisch-fundierte neuroarbeitswissenschaftliche Methoden entwickeln, die eine systematische Erfassung und Bewertung mentaler Zustände auf Individual- und Teamebene in realen Arbeitskontexten erlauben. Für die Neuroarbeitswissenschaft ergeben sich daher drei wesentliche Ziele [1–3]:

1. „Neuroarbeitswissenschaftliche Theorie“ beschäftigt sich damit, neuronale Korrelate menschlicher Leistung, Kognition und Motivation zu identifizieren, zu beschreiben und zu bewerten, einschließlich der Interaktionen zwischen Mensch und technologischen Systemen im Arbeitskontext.
2. „Neuroarbeitswissenschaftliche Abstraktion“ bezieht sich auf die Anwendung dieser neuronalen Korrelate, um Vorhersagen über mentale Zustände und Verhalten zu treffen, die sich in alltäglichen realen Aktivitäten validieren lassen.
3. „Neuroarbeitswissenschaftliches Design“ verfolgt das Ziel, Erkenntnisse über Signaturen mentaler Zustände in technische Systeme und Schnittstellen zu integrieren, um individuelle Anforderungen und Leistungen aus Sicht der Nutzenden zu erfüllen.

Entsprechend kann der neuroarbeitswissenschaftliche Designprozess als Abgleich zwischen den Fähigkeiten und Grenzen des menschlichen Gehirns und den Anforderungen sowie Handlungsmöglichkeiten von Systemen, Technologien und Umgebungen verstanden werden.

Neurokognitive Aspekte zu berücksichtigen, wird in Zukunft immer wichtiger, da unsere digitale Arbeitswelt zunehmend von mentaler Arbeit geprägt ist. Vorrangig physisch geprägte Arbeit ist noch vorhanden, wird jedoch immer stärker durch autonome und adaptive Technik ergänzt und somit durch kognitive Aspekte erweitert. Dieser zunehmende Einsatz von Technologien führt zu fragmentierten Arbeitsprozessen und steigenden Anforderungen an Aufmerksamkeit und Multitasking. Dies kann zu einer erhöhten kognitiven Belastung führen. Die größte Herausforderung der zunehmenden Technologisierung und Automatisierung der Ar-

beitswelt besteht darin, „wirklich“ mensch-zentrierte und individuell anpassbare Schnittstellen zu entwickeln, die jeden Nutzen optimal in seinen Tätigkeiten unterstützen – ohne kognitive Überlastung oder Einschränkung der Autonomie, um damit langfristig die Leistungsfähigkeit und Gesundheit der Nutzenden zu bewahren. Ergebnisse der Neuroarbeitswissenschaft sind zukünftig unerlässlich, um die Herausforderungen einer zunehmend digitalen Arbeitswelt mit einem menschenzentrierten Designansatz gezielt zu adressieren.

## 1.2 Brain-Computer Interfaces (BCIs): Methoden, Typen und technische Grundlagen

Die zunehmende Integration neuroarbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse in die Gestaltung technischer Systeme erfordert Technologien, die neuronale Signale und mentale Zustände des Menschen präzise erfassen und interpretieren können. Fortschritte in den Bereichen Sensortechnik, Signalverarbeitung und künstliche Intelligenz (KI) erlauben es, technische Systeme zu entwickeln, die nicht nur flexibler und eigenständiger, sondern auch adaptiver auf menschliche Bedürfnisse und Verhalten reagieren. Von entscheidender Bedeutung für den Erfolg in der Interaktion ist die Erfassung menschlicher Handlungen, Absichten und Aufmerksamkeit [11, 12]. Technologische Innovationen durch kame-rabasierte Systeme sowie Virtual und Augmented Reality (VR/AR) haben die visuelle Erfassung und Interpretation menschlicher Zustände entscheidend vorangetrieben. Produkte wie „Microsoft HoloLens“, „Magic Leap“ oder „Apple Vision Pro“ zeigen eindrucksvoll, wie diese Technologien in der Praxis umgesetzt werden können. In Kombination mit Eye-Tracking ermöglichen sie eine detaillierte Analyse von Absichten und Blickverhalten, wodurch die Interaktion zwischen Mensch und autonomen technischen Systemen deutlich verbessert wird.

Vor allem Brain-Computer Interfaces (BCIs) haben sich dabei als Schlüsseltechnologie etabliert, die eine direkte Interaktion oder Kommunikation zwischen dem menschlichen Gehirn und technischen Systemen erlaubt [13–15]. Ein BCI stellt die unmittelbarste Form einer Schnittstelle zwischen Mensch und Computer dar. Durch die Erfassung neuronaler Aktivitätsmuster mithilfe mobiler nicht-invasiver neurophysiologischer Messmethoden wie EEG, fNIRS oder invasiver Verfahren (Elektrokortikographie, ECoG) können mentale Zustände in Echtzeit abgeleitet und mittels maschineller Lernverfahren klassifiziert werden. Die daraus gewonnene Information über die mentalen Zustände der Nutzenden kann in künstliche Kommandos zur Ansteuerung diverser technischer Systeme übersetzt werden, ohne dass motorische Eingaben erforderlich sind.

Traditionell wird die BCI-Forschung primär im klinischen Bereich angewandt, beispielsweise zur Unterstützung von Patienten mit schweren motorischen Einschränkungen oder zur Kommunikation mit Patienten im Locked-in-Zustand [16–18]. In den letzten Jahren rückten jedoch vermehrt nicht-klinische Anwendungen in den Vordergrund, welche vor allem die Neuroarbeitswissenschaft und die adaptive Mensch-Technik-Interaktion fokussieren.

Prinzipiell lassen sich drei unterschiedliche Typen von BCIs unterscheiden: die aktiven, reaktiven und passiven BCIs. Für die Forschung und Anwendung in der Neuroarbeitswissenschaft sind vor allem passive und reaktive BCIs besonderes relevant.

- „Aktive BCIs“ erfordern bewusste und gezielte mentale Aktivitäten der Nutzenden, beispielsweise die mentale Vorstellung

von Bewegungen (motor imagery). Diese gezielten Gedanken generieren spezifische neuronale Muster, die durch das BCI-System erkannt und in Steuerungsbefehle übersetzt werden. Aktive BCIs finden häufig Anwendung in unterstützender Technologie oder Rehabilitationssystemen [19–21].

- „Reaktive BCIs“ basieren auf spezifischen Gehirnreaktionen auf externe Stimuli, etwa visuelle oder auditorische Reize. Typische Beispiele für solche reaktiven Systeme sind BCIs, die Steady-State Visually Evoked Potentials (SSVEP) oder ereigniskorrelierte Potenziale (wie Fehler- oder Aufmerksamkeitspotenziale) nutzen. Reaktive BCIs erlauben eine zuverlässige und intuitive Steuerung technischer Geräte, beispielsweise in der Mensch-Roboter-Interaktion oder für Kommunikationshilfen [22, 23].
- „Passive BCIs“ hingegen erfassen kontinuierlich und implizit mentale Zustände wie kognitive Belastung, Aufmerksamkeitsniveau oder affektiv-emotionale Zustände, ohne dass Nutzende bewusst aktiv werden müssen. Passive BCIs dienen vor allem dazu, technische Systeme an mentale Zustände und Bedürfnisse der Nutzenden automatisch anzupassen, wodurch Überlastung verhindert und Flow-Erleben und Lernen gefördert werden kann [6, 24, 25].

Die technische Umsetzung eines BCI erfordert eine sorgfältige Abfolge komplexer Signalverarbeitungsschritte.

Zunächst werden Rohdaten mithilfe entsprechender Sensorik (zum Beispiel EEG-Elektroden) erfasst. Anschließend erfolgt eine Datenvorverarbeitung, welche die Entfernung von Artefakten (zum Beispiel Muskel- oder Augenbewegungen) und Filterung relevanter Signalinhalte (zum Beispiel bestimmte Frequenzanteile im EEG-Signal) enthält. In der nachfolgenden Merkmalsextraktion werden spezifische Eigenschaften neuronaler Muster identifiziert, bevor maschinelle Lernalgorithmen diese Muster klassifizieren und in Steuerungsbefehle übersetzen (für eine detaillierte Beschreibung siehe [14]).

Die Kombination aus fortschrittlicher Sensorik, Echtzeit-Signalverarbeitung und adaptiver KI-Algorithmen eröffnet enormes Potenzial für die neuroergonomische Forschung und Praxis. BCIs eröffnen nicht nur neue Möglichkeiten der Interaktion zwischen Mensch und Technologie, sondern liefern zugleich fundamentale Erkenntnisse über neurokognitive Prozesse bei komplexen und dynamischen Aufgabenstellungen. Damit bilden sie die technische Grundlage für die Entwicklung neuroadaptiver Systeme, die sich kontinuierlich und nutzerzentriert an die individuellen mentalen Zustände ihrer Nutzer anpassen.

### 1.3 Neuroadaptive Systeme: Definition, Unterschiede zu klassischen adaptiven Systemen, Charakteristika

Die Fortschritte in der Entwicklung von BCI-Technologien und die zunehmenden Kenntnisse über die neurokognitiven Grundlagen menschlicher Wahrnehmung, Leistung und Handeln eröffnen neue Perspektiven für die Gestaltung interaktiver technischer Systeme. Neuroadaptive Systeme repräsentieren hierbei einen bedeutenden nächsten Schritt, indem sie den direkten Einblick in mentale Zustände und Prozesse nutzen, um die Mensch-Technik-Interaktion in Echtzeit individuell anzupassen und somit nachhaltig zu verbessern [14, 15].

Im Gegensatz zu klassischen adaptiven Assistenzsystemen [11, 26, 27], die vor allem auf expliziten Eingaben der Nutzenden oder auf beobachtbarem Verhalten beruhen, erfassen neuroadap-

tive Systeme implizit neurophysiologische Signale und mentale Zustände. Diese Systeme verwenden kontinuierlich erfasste Daten aus Verfahren wie EEG, fNIRS, Eye-Tracking und physiologischen Sensoren (zum Beispiel Herzfrequenz oder Hautleitwert), um ein umfassendes und detailliertes Bild des mentalen Zustands der Nutzenden zu erhalten. Daraus lassen sich relevante Informationen über kognitive Belastung, Aufmerksamkeit, emotionale Verfassung oder sogar Intentionen ableiten.

Ein zentrales Merkmal neuroadaptiver Systeme ist ihre implizite Funktionsweise. Während traditionelle aktive BCI-Technologien in der medizinischen Anwendung eine bewusste und gezielte Steuerung durch die Nutzenden erfordern, agieren neuroadaptive Systeme im Hintergrund, ohne dass explizite Eingaben oder bewusste mentale Aktionen nötig sind. Dies erlaubt eine natürliche und ungestörte Interaktion, bei der die Systeme subtil und automatisch auf Veränderungen der mentalen Zustände reagieren können. Neuroadaptive Systeme zeichnen sich insbesondere durch folgende Charakteristika aus:

1. „Kontinuierliche Echtzeit-Erfassung“: Sie erfassen kontinuierlich mentale Zustände anhand neurophysiologischer Signale, wodurch sie in der Lage sind, unmittelbar auf Veränderungen im mentalen Zustand der Nutzenden zu reagieren
2. „Implizite Interaktion“: Anders als aktive Steuerungen erfordern sie keine bewusste Interaktion, sondern passen ihre Unterstützung automatisch und subtil im Hintergrund an die jeweiligen Bedürfnisse und Fähigkeiten der Nutzenden an.
3. „Personalisierte Adaptivität“: Da mentale Zustände individuell stark variieren können, passen sich neuroadaptive Systeme nicht nur situativ, sondern auch individuell an die spezifischen neuronalen und physiologischen Signaturen der Nutzenden an.
4. „Ganzheitliches Nutzermodell“: Neben grundlegenden Zustandsinformationen berücksichtigen sie auch feingranulare Aspekte wie kognitive Fähigkeiten, Vorlieben und Fertigkeiten sowie deren kontextuelle und situative Veränderungen.

Durch diese fortschrittlichen Merkmale erlauben neuroadaptive Systeme eine wirklich symbiotische Interaktion zwischen Mensch und Maschine, bei der beide Seiten gemeinsam und optimal zusammenarbeiten können [14, 15]. Technische Systeme werden so zu empathischen Partnern, die individuelle Bedürfnisse und aktuelle mentale Belastungen berücksichtigen und proaktiv unterstützen, ohne die Autonomie der Nutzenden einzuschränken oder zusätzliche Belastungen zu erzeugen.

Entscheidender Forschungsbedarf besteht in der Entwicklung robuster und zuverlässiger computergestützter Nutzermodelle, die feinere Abstufungen mentaler Zustände zuverlässig abbilden können. Ziel ist es, eine Systemanpassung zu ermöglichen, die nicht nur einfachen Kontextinformationen folgt, sondern auch komplexere und dynamischere Situationen bewältigen kann. So könnten neuroadaptive Systeme zukünftig eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung menschengerechter, individuell unterstützender und nachhaltiger technischer Lösungen spielen, die den Anforderungen und Fähigkeiten jedes Einzelnen gerecht werden.

## 2 Veränderungen in der Arbeitswelt: Neuroadaptive Technologie als Antwort

Die moderne Arbeitswelt befindet sich in einem grundlegenden Wandel. Wo früher körperlich anspruchsvolle Tätigkeiten im Vordergrund standen, dominiert heute zunehmend die mental

herausfordernde Wissens- und Informationsarbeit. Dieser Wandel wird durch die Digitalisierung und den Einsatz von KI-Technologien weiter beschleunigt und bringt neben zahlreichen Chancen auch neue Herausforderungen mit sich. Eine zunehmend vernetzte und hochgradig automatisierte Arbeitsumgebung bietet zwar beträchtliche Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung, Innovationsförderung und Entwicklung neuer Geschäftsmodelle. Gleichzeitig gehen diese Entwicklungen jedoch mit einer deutlichen Zunahme der mentalen Belastungen einher: Permanente Erreichbarkeit, Informationsüberflutung, erhöhte Komplexität der Aufgaben, Leistungsüberwachung, sowie häufige Unterbrechungen und erzwungenes Multitasking belasten Mitarbeitende zunehmend [28]. Die Folgen sind bereits heute spürbar und alarmierend: Psychische Erkrankungen verzeichnen seit Jahren einen stetigen Anstieg und sind mit durchschnittlich 47 Arbeitsunfähigkeitstagen pro Fall eine erhebliche betriebs- und volkswirtschaftliche Belastung [29].

Angesichts dieser Entwicklung ist es von entscheidender Bedeutung, wissenschaftlich und praktisch fundierte Erkenntnisse darüber zu gewinnen, welche Faktoren die mentale Belastung am Arbeitsplatz verstärken und wie Arbeitsprozesse und Arbeitsumgebungen so gestaltet werden können, dass sie nicht nur Leistung und Effizienz fördern, sondern langfristig auch Wohlbefinden und positive mentale Zustände, wie Flow-Erlebnisse, ermöglichen. Hier setzen neuroadaptive Technologien gezielt an, indem sie den mentalen Zustand der Nutzenden berücksichtigen und technische Systeme an deren individuelle Bedürfnisse und Fähigkeiten anpassen. Unternehmen, die neuroadaptive Technologien frühzeitig in ihre Prozesse und Strategien integrieren, können nicht nur die mentale Gesundheit und das Wohlbefinden ihrer Mitarbeitenden nachhaltig verbessern, sondern zugleich ihre Innovationsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit stärken. Die praktischen Anwendungsfelder solcher Technologien erstrecken sich bereits heute über zahlreiche Branchen und bieten vielversprechende Möglichkeiten für die nachhaltige Gestaltung zukünftiger Arbeitswelten.

## 2.1 Vielversprechende Anwendungsfelder neuroadaptiver Systeme

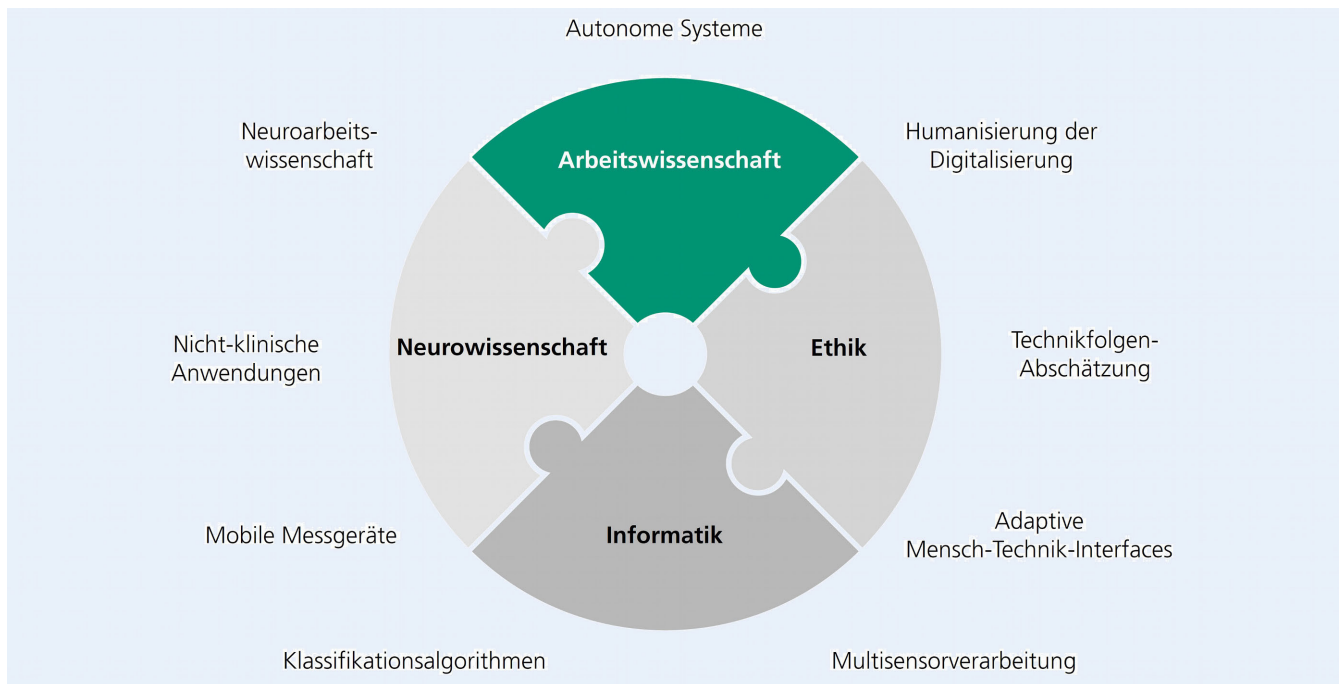
Neuroadaptive Technologien bieten erhebliche Potenziale, um aktuellen und zukünftigen Herausforderungen der Arbeitswelt effektiv zu begegnen. Die folgenden Anwendungsfelder zeigen exemplarisch, wie neuroadaptive Systeme in unterschiedlichen Branchen zur Optimierung von Leistung, Wohlbefinden und Sicherheit beitragen können. Diese Anwendungsfelder verdeutlichen das enorme Potenzial neuroadaptiver Technologien zur Gestaltung nachhaltiger, menschengerechter und zukunftsfähiger Arbeitswelten. Es ist wichtig zu betonen, dass diese Beispiele erste realistische Anwendungen darstellen und die Zukunft offen für zahlreiche weitere, innovative Entwicklungen und Nutzungsmöglichkeiten bleibt.

- „Adaptive Mensch-Roboter-Interaktion“
  - „Branche“: Produktion, Medizinrobotik
  - „Konstrukt“: Mentale Belastung und Aufmerksamkeit
  - „Use Case“: Kollaborative Industrieroboter erkennen in Echtzeit mentale Zustände von Nutzenden und passen ihre Aktionen entsprechend an, um eine sichere und effiziente Zusammenarbeit zu gewährleisten. Im Bereich der Medizinrobotik unterstützen neuroadaptive Systeme chirurgische

Eingriffe durch Echtzeit-Erfassung des mentalen Zustands von chirurgischem Fachpersonal, um Überlastung frühzeitig zu erkennen und chirurgische Präzision und Patientensicherheit zu maximieren.

- „Nutzen“: Erhöhung der Sicherheit, Prävention von Überlastung, Verbesserung der Interaktion und Präzision.
- „Assistenzsysteme für Büro- und Produktionsarbeit“
  - „Branche“: Büroarbeit, industrielle Produktion
  - „Konstrukt“: Mentale Belastung und Aufmerksamkeit
  - „Use Case“: Ein neuroadaptives System wird eingesetzt, um Aufmerksamkeitsprozesse und damit verbundene Aufgabenschwierigkeiten zu erfassen, um die kognitive Belastung zu minimieren und gezielt Arbeitsprozesse für Deep-Work-Tätigkeiten zu fördern. Aufgaben lassen sich dynamisch an Komplexität anpassen, um Nutzende optimal zu fördern, ohne sie mental zu überlasten. So kann ein optimaler Zustand zwischen Herausforderung und Kompetenz erreicht werden.
  - „Nutzen“: Förderung des Flow-Erlebens, Verbesserung der kognitiven Leichtigkeit, Reduktion mentaler Belastungen
- „Digitale Lern- und Weiterbildungssysteme“
  - „Branche“: Bildungs- und Weiterbildungssektor
  - „Konstrukt“: Mentale Belastung, Aufmerksamkeit, Flow
  - „Use Case“: EEG-basierte, neuroadaptive Lernplattformen identifizieren individuelle kognitive Belastungen während des Lernprozesses und passen Inhalte, Lerntempo und Feedback individuell an die Bedürfnisse der Lernenden an. Die Lernenden gelangen so in eine optimale Balance zwischen Herausforderung und Belastung, wodurch das Engagement und Lernerfolg gezielt gefördert werden.
  - „Nutzen“: Steigerung der Lernerfolge und Lernmotivation, effizienteres Lernen durch individuelle Anpassung.
- „Gaming und Therapie“
  - „Branche“: Unterhaltungs- und Freizeitindustrie sowie Gesundheit
  - „Konstrukt“: Flow und affektive Reaktionen
  - „Use Case“: Die Kombination aus neuroadaptiver Technologie und Mixed-Reality Umgebungen ermöglicht eine individualisierte Gehirn-Körper-Erfahrung, bei der das Nutzerengagement eine Schlüsselrolle spielt. Anhand neurophysiologischer Signale lassen sich etwa die Schwierigkeit oder Immersion von Spielen oder gamifizierte Neurofeedback-Systeme an Flow oder affektiver Reaktionen optimal anpassen.
  - „Nutzen“: Verbesserung der Nutzereinbindung und -erfahrung, von psychischer Gesundheit und Förderung kognitiver Funktionen.
- „Sicherheitsrelevante Arbeitsfelder“
  - „Branche“: Luftfahrt, Bahnverkehr, Leitstände, kritische Infrastruktur, Produktion
  - „Konstrukt“: Mentale Beanspruchung, Situationsbewusstsein
  - „Use Case“: Neuroadaptive KI-Assistenzsysteme (ein sogenanntes KI-Cockpit) überwachen mentale Zustände von Piloten oder Mitarbeitenden in sicherheitskritischen Kontrollzentren kontinuierlich. Bei identifizierter Überlastung oder Unaufmerksamkeit greifen technische Assistenzsysteme unterstützend ein, etwa durch Alarme, Hinweise oder automatische Delegation weniger kritischer Aufgaben an technische Systeme.





**Interdisziplinäre Forschungsbereiche** und sich daraus ergebende Forschungsthemen in den Schnittmengen der jeweiligen Gebiete.

Grafik: eigene Darstellung, Fraunhofer IAO

- „Nutzen“: Erhöhung des Situationsbewusstseins, Prävention kritischer Fehler, gesteigerte Betriebssicherheit.

## 2.2 Herausforderungen und Risiken neuroadaptiver Systeme

Obwohl neuroadaptive Systeme großes Potenzial für eine nachhaltige und gesunde Gestaltung zukünftiger Arbeitswelten bieten, steht ihre Entwicklung und Implementierung noch vor einigen Herausforderungen und Risiken. Diese Aspekte gilt es gezielt zu adressieren, um eine erfolgreiche und verantwortungsbewusste Integration in den Arbeitsalltag zu ermöglichen.

Eine wesentliche Herausforderung liegt in der technischen Umsetzung für den Praxiseinsatz. Die zuverlässige Klassifikation mentaler und kognitiver Zustände erfordert qualitativ hochwertige, umfassende und gut vortrainierte Datensätze. Die Erstellung solcher Datensätze ist aber ressourcenintensiv in Bezug auf Zeit, finanzielle Mittel und organisatorische Kapazitäten. Ein zentraler Ansatz der aktuellen Forschung am Fraunhofer IAO liegt daher in der Entwicklung allgemeingültiger Datensätze und Modelle (Foundation Models) für Gehirn- und Verhaltensdaten. Ähnlich den bekannten Large Language Models (LLMs) könnten solche Modelle als universelle Basismodelle dienen, die sich durch spezifische Anpassungen und Feinabstimmungen für unterschiedliche neuroadaptive Anwendungen individualisieren und optimieren lassen. So ließe sich nicht nur die Notwendigkeit umfangreicher Trainingsdatensätze reduzieren, sondern auch die Skalierbarkeit und Adaptivität technischer Assistenzsysteme erheblich verbessern.

Eine weitere technische Herausforderung ist die Alltagstauglichkeit neuroadaptiver Sensorik. EEG-basierte BCI-Technologien basieren häufig auf Gel-Elektroden, was die praktische Nutzung einschränkt. Zwar existieren bereits trockenbasierte oder wasserbasierte Systeme, jedoch bestehen weiterhin Herausforderungen

bei Tragekomfort, Stabilität der Messqualität und Langzeitnutzung. Diese Aspekte sind entscheidend für die Nutzerakzeptanz – ein Schlüsselfaktor für den erfolgreichen Einsatz neuroadaptiver Systeme.

Die Akzeptanz neuroadaptiver Technologien wird zudem maßgeblich durch Vertrauen und verantwortungsvollen Umgang mit sensiblen Daten bestimmt. Datenschutz und Persönlichkeitsschutz sind zentrale Themen in der Debatte um neuroadaptive Technologien. Besonders bei der Erhebung und Verarbeitung von EEG-, Vital- und Verhaltensdaten muss höchste Sorgfalt gelten, um Nutzende vor Diskriminierung oder missbräuchlicher Nutzung ihrer Daten zu schützen. Ziel neuroadaptiver Anwendungen sollte es stets sein, die Optimierung von Arbeitsprozessen und eine Verbesserung des Wohlbefindens zu erreichen – nicht eine individuelle Leistungsüberwachung. Auch die technische Infrastruktur der Datenerhebung spielt eine entscheidende Rolle. Viele marktübliche Wearables nutzen cloudbasierte Analysen auf den Servern großer Hersteller, wodurch die Kontrolle über die Datenverarbeitung verloren gehen kann. Ein alternativer Ansatz besteht in der Entwicklung eigener Algorithmen und Sensorkonzepte, die unabhängig von kommerziellen Plattformen operieren, DSGVO- und EU-AI-Act-konform sind und so eine größere Datensouveränität erlauben. Beispielhaft steht hier das Projekt „ProRotation“ (gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung) unter Beteiligung des Fraunhofer IAO, das ein datenschutzkonformes Modell zur Anpassung von Job-Rotationsprozessen in der industriellen Produktion und Logistik auf Basis von physiologischen Sensordaten entwickelt hat.

Neben den technischen und regulatorischen Fragen spielen auch ethische Aspekte eine entscheidende Rolle. Transparenz und Nachvollziehbarkeit neuroadaptiver Systeme sind essenziell, um Vertrauen und Akzeptanz bei den Nutzenden zu schaffen. Im Rahmen des wegweisenden Projekts KI-Cockpit (gefördert durch das Bundesministerium für Arbeit und Soziales) wird beispiels-

weise erforscht, wie Menschen KI-gestützte Systeme effektiv überblicken und steuern können. Gleichzeitig gewinnen erklärbar KI-Techniken (XAI) zunehmend an Bedeutung, da sie helfen, die oft kritisierte „Black Box“ von KI-Algorithmen für den Menschen verständlicher zu machen. Die Weiterentwicklung solcher erklärbaren Modelle für Gehirn- Vital- und Verhaltensdaten kann wesentlich dazu beitragen, bestehende Barrieren zu überwinden und den erfolgreichen Einsatz neuroadaptiver Technologien langfristig zu sichern.

Trotz der dargestellten Herausforderungen zeigen sich enorme Perspektiven für die Neuroarbeitswissenschaft. Die adressierten Aspekte sind nicht nur technischer Natur, sondern auch eine motivierende Aufforderung an Wissenschaft und Industrie, weiterhin intensiv an Lösungen zu arbeiten, um das volle Potenzial neuroadaptiver Systeme für die Arbeitswelt der Zukunft zu erschließen.

### 3 Ausblick und strategische Handlungsempfehlungen

Die Neuroarbeitswissenschaft eröffnet vielfältige Potenziale sowohl für die Forschung als auch die wirtschaftliche Praxis. Durch mobile Messgeräte und performante Klassifikationsalgorithmen erschließen sich völlig neue Perspektiven jenseits der klinischen Anwendung. Im Bereich der Informatik entstehen daraus neue Herausforderungen für die Echtzeitverarbeitung von Big Data sowie die Entwicklung kontextsensitiver Assistenzsysteme und adaptiver Mensch-Technik-Schnittstellen. Gleichzeitig fordert die zunehmende praktische Anwendung neuroadaptiver Technologien eine konsequente Ausrichtung an den Bedürfnissen und Wertvorstellungen der Nutzenden sowie der Gesellschaft insgesamt. Innovationsfreudige Unternehmen, etwa in der Automobilbranche, Maschinenbau, Informationstechnik oder auch Medizintechnologien, erkennen zunehmend die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Chancen neuroadaptiver Technologien. Sie beginnen, diese Technologien nicht nur in der Konsumentenforschung einzusetzen, sondern sie auch direkt in interaktive Produkte und Systeme zu integrieren.

Diese Entwicklung verlangt von Unternehmen ein hohes Maß an interdisziplinärer Zusammenarbeit sowie einen bewussten Umgang mit sozialen, ethischen und gesellschaftlichen Fragestellungen (siehe **Bild**).

Neben technischen Innovationen müssen neuroadaptive Systeme insbesondere verständlich, sozialverträglich und lernfördernd gestaltet sein. Fragen wie „Wem gehören die erhobenen Daten?“, „Zu welchem Zweck werden die Daten genutzt?“ und „Wie vertrauenswürdig und transparent sind die eingesetzten KI-Algorithmen?“ werden zentral für die Akzeptanz und den erfolgreichen Einsatz sein [15]. Um dies sicherzustellen, müssen Nutzen aktiv und konsequent in den Gestaltungs- und Entwicklungsprozess eingebunden werden (wie etwa nach dem Prinzip des Human-Centered Design). Auch regelmäßige Informations- und Dialogveranstaltungen mit Medienvertretern, Multiplikatoren und der interessierten Öffentlichkeit sind wesentlich, um Akzeptanz und Vertrauen in neue Technologien weiter zu stärken. Künftig sollten Forschungsaktivitäten darauf ausgerichtet sein, neuroadaptive Systeme konsequent an menschlichen Bedürfnissen und ethischen Werten zu orientieren.

Ziel sollte es sein, einen Innovations- und Erfahrungsraum zu schaffen, indem der Mehrwert und Nutzen der Systeme unter möglichst realistischen, alltagsnahen Bedingungen evaluiert und

validiert werden kann. Ein transparenter Wissenstransfer sowie die Einbindung einer breiten Öffentlichkeit und verschiedenster Multiplikatoren sind dabei unerlässlich, um diese Technologien erfolgreich in die Praxis zu übertragen und gesellschaftlich zu verankern. Dadurch wird sichergestellt, dass bei der Entwicklung neuroadaptiver Mensch-Technik-Systeme zentrale Prinzipien wie Nutzerzentrierung, partizipatives Design, Datensouveränität, wissenschaftliche Fundierung und praktische Anwendbarkeit stets im Fokus stehen [15].


#### L I T E R A T U R

- [1] Parasuraman, R.: Neuroergonomics: Research and practice. Theoretical Issues in Ergonomics Science 4 (2003) 1–2, pp. 5–20
- [2] Dehaes, F.; Karwowski, W.; Ayaz, H.: Brain at Work and in Everyday Life as the Next Frontier: Grand Field Challenges for Neuroergonomics. Frontiers in neuroergonomics 1 (2020), #583733, doi.org/10.3389/fnrgo.2020.583733
- [3] Gramann, K.; McKendrick, R.; Baldwin, C. et al.: Grand Field Challenges for Cognitive Neuroergonomics in the Coming Decade. Frontiers in neuroergonomics 2 (2021), #643969, doi.org/10.3389/fnrgo.2021.643969
- [4] Lingelbach, K.; Gado, S.; Wirzberger, M. et al.: Workload-dependent hemispheric asymmetries during the emotion-cognition interaction: a close-to-naturalistic fNIRS study. Frontiers in neuroergonomics 4 (2023), #1273810, doi.org/10.3389/fnrgo.2023.1273810
- [5] Gado, S.; Lingelbach, K.; Wirzberger, M. et al.: Decoding Mental Effort in a Quasi-Realistic Scenario: A Feasibility Study on Multimodal Data Fusion and Classification. Sensors (Basel, Switzerland) 23 (2023) 14, doi.org/10.3390/s23146546
- [6] Lingelbach, K.; Diers, D.; Vukelić, M.: Towards User-Aware VR Learning Environments: Combining Brain-Computer Interfaces with Virtual Reality for Mental State Decoding. CHI '23: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Hamburg, 2023, pp. 1–8
- [7] Scholz, A. (Hrsg.): EEG-basierte Erfassung von Aufmerksamkeitsprofilen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014
- [8] Kahneman, D.: Attention and effort. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc 1973
- [9] Wickens, C. D.: Multiple resources and performance prediction. Theoretical Issues in Ergonomics Science 3 (2002) 2, pp. 159–177
- [10] Endsley, M.: A taxonomy of situation awareness errors, human factors in aviation operations. In: Fuller, R.; Johnston, N.; McDonald, N. (eds.): Human Factors in Aviation Operations. Proceedings of the 21st Conference of the European Association for Aviation Psychology. Aldershot: Avebury Aviation pp. 287–292
- [11] Carreira, J.; Zisserman, A.: Quo Vadis, Action Recognition? A New Model and the Kinetics Dataset. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, 2017, pp. 4724–4733
- [12] Liu, Z.; Ning, J.; Cao, Y. et al.: Video Swin Transformer. E-print: 2021, arxiv.org/abs/2106.13230
- [13] Vukelić, M.: Connecting Brain and Machine: The Mind Is the Next Frontier. In: Friedrich, O.; Wolkenstein, A.; Bubltz, C. et al. (Hrsg.): Clinical Neurotechnology meets Artificial Intelligence. Cham: Springer International Publishing 2021, pp. 215–226
- [14] Vukelić, M.; Lingelbach, K.; Piechnik, D.: Feinfühlige Technik. In: Bauer, W.; Riedel, O.; Renner, T.; Peissner, M. (Hrsg.): Feinfühlige Technik. Studie. Stuttgart: Fraunhofer IAO, S. 90, doi.org/10.24406/publica-fhg-300856
- [15] Vukelić, M.; Tagalidou, N.: 6 Personalisierte Feinfühlige Technik. In: Kovács, L. (Hrsg.): Künstliche Intelligenz und menschliche Gesellschaft. Berlin: De Gruyter 2023, S. 75–88
- [16] Ramos-Murguialday, A.; Broetz, D.; Rea, M. et al.: Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. Annals of neurology 74 (2013) 1, pp. 100–108
- [17] Wolpaw, J. R.; Birbaumer, N.; McFarland, D. J. et al.: Brain-computer interfaces for communication and control. Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology 113 (2002) 6, pp. 767–791
- [18] Birbaumer, N.; Ghanayim, N.; Hinterberger, T. et al.: A spelling device for the paralysed. Nature 398 (1999) #6725, pp. 297–298
- [19] Kern, K.; Vukelić, M.; Guggenberger, R. et al.: Oscillatory neurofeedback networks and poststroke rehabilitative potential in severely impaired stroke patients. Neurolmage. Clinical 37 (2023), #103289

- [20] Vukelić, M.; Belardinelli, P.; Guggenberger, R. et al.: Different oscillatory entrainment of cortical networks during motor imagery and neurofeedback in right and left handers. *NeuroImage* 195 (2019), pp. 190–202
- [21] Brauchle, D.; Vukelić, M.; Bauer, R. et al.: Brain state-dependent robotic reaching movement with a multi-joint arm exoskeleton: combining brain-machine interfacing and robotic rehabilitation. *Frontiers in human neuroscience* 9 (2015), doi.org/10.3389/fnhum.2015.00564
- [22] Vukelić, M.; Bui, M.; Vorreuther, A. et al.: Combining brain-computer interfaces with deep reinforcement learning for robot training: a feasibility study in a simulation environment. *Frontiers in neuroergonomics* 4 (2023), #1274730
- [23] Dehais, F.; Cabrera Castillos, K.; Ladouce, S. et al.: Leveraging textured flickers: a leap toward practical, visually comfortable, and high-performance dry EEG code-VEP BCI. *Journal of neural engineering* 21 (2024) 6, doi.org/10.1088/1741-2552/ad8ef7
- [24] Vorreuther, A.; Lingelbach, K.; Vukelić, M.: In an optimal balance: Using an implicit EEG-based method to uncover individual flow experiences. *The 5th International Neuroergonomics Conference, Bordeaux/France, 2024*, pp. 703–710, doi.org/10.3389/978-2-8325-5121-9
- [25] Vukelić, M.; Lingelbach, K.; Pollmann, K. et al.: Oscillatory EEG Signatures of Affective Processes during Interaction with Adaptive Computer Systems. *Brain sciences* 11 (2020) 1, doi.org/10.3390/brainsci11010035
- [26] Roitberg, A.; Peng, K.; Schneider, D. et al.: Is My Driver Observation Model Overconfident? Input-Guided Calibration Networks for Reliable and Interpretable Confidence Estimates. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23 (2022) 12, pp. 25271–25286
- [27] Peng, K.; Yin, C.; Zheng, J. et al.: Navigating Open Set Scenarios for Skeleton-based Action Recognition. *E-print: 2023*, arXiv:2312.06330
- [28] Gimpel, H.; Lanzl, J. Regal, C. et al.: Gesund digital arbeiten?! Stand: 2019. Internet: [www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Kooperation/Gesund-digital-arbeiten](http://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Kooperation/Gesund-digital-arbeiten). Zugriff am 23.04.2025
- [29] Techniker Krankenkasse: Gesundheitsreport Arbeitsunfähigkeiten. Stand: 2023 Internet: [www.tk.de/resource/blob/2146912/44b10e23720bf38c1559538949dd1078/gesundheitsreport-au-2023-data.pdf](http://www.tk.de/resource/blob/2146912/44b10e23720bf38c1559538949dd1078/gesundheitsreport-au-2023-data.pdf). Zugriff am 23.04.2025

**Dr. Mathias Vukelić**   
[mathias.vukelic@iao.fraunhofer.de](mailto:mathias.vukelic@iao.fraunhofer.de)

**Dr. Nektaria Tagalidou** 

**Prof. Dr. Katharina Hölzle**   
 Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO  
 Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
[www.iao.fraunhofer.de](http://www.iao.fraunhofer.de)

Dr. Nektaria Tagalidou

Prof. Dr. Katharina Hölzle  
 Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft  
 und Technologiemanagement IAT  
 Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
[www.iat.uni-stuttgart.de](http://www.iat.uni-stuttgart.de)

## LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons  
 Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)